



遥感在环境健康研究中的应用

未来十年许多对地观测的新任务正在规划之中，包括欧洲空间局（European Space Agency）的MetOp二代卫星（见图）搭载哨兵-5。与此同时，研究人员正在探索现有卫星数据的新用途。

© 145/Steve Outram/Ocean/Corbis

目前有 1000 多颗人造卫星围绕地球运行。有一些靠近地球大气层，距离地球只有几百公里，有一些距离上万公里。人造卫星可用于通讯、导航、国防和科学。少数人造卫星的作用十分重要且其作用范围正在迅速扩大：通过监测地球表面和大气来追踪与人类健康紧密相关的环境状况。

全球的研究人员和政府机构已在使用卫星数据来监测空气污染物、流行性传染病、有害藻华（harmful algal blooms, HABs）、气候变化等。目前的研究表明，这只是在科技应用的开始，统称为“遥感”。未来几年，新的人造卫星会提供分辨率更高的图像以及更稳健和更精确的算法来处理传输数据。因此，研究人员期待这将大幅提高他们观测和了解地球陆地、水和空气的能力，范围覆盖全球海域和内陆。

1958年美国国家航空和航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了第一颗人造卫星,2年后发射了美国第一颗气象卫星。随后几十年中,流行病学和公共卫生领域的人士开始积极研究卫星数据,NASA应用科学健康和空气质量应用方案的项目主任John Haynes说。近年来,随着新方法的出现和改进(包括空气质量测量和媒介传播疾病预测),对于遥感数据的关注度激增。“在应用遥感解决公共卫生问题方面,的确发生了巨大的变化,”Haynes说。“对这方面的关注每年都在增加。”

的确,2015年3月前NASA计划在12个月内启动6个地球观测任务,比过去10年中的任何一年都多。新发射的卫星中包括一个密切测量全球雨水和降雪的“全球降水量观测台”,以及一颗测量土壤水分的人造卫星和一颗检测碳如何在地球大气、陆地和海洋之间移动的人造卫星。此外,国际空间站将接收3个新仪器,一个将观察风如何在全球运动,一个将测量云和气溶胶(悬浮在大气中的颗粒物),目前气候变化模型依然难以预测这两个变量,还有一个将在全球范围长期测量地球大气主要成分,包括气溶胶和臭氧。这项工作将进行8年左右,同时NASA以及欧洲和亚洲的其他空间机构计划发射新的卫星,将提供分辨率更高的地球照片。

随着科学技术的进步,第三次发展产生了全新优化的卫星数据应用方法:据Haynes介绍,NASA及国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的卫星数据可以免费获取,而欧洲空间局(European Space Agency, ESA)已经降低了费用并承诺下一代卫星的数据可以免费获取。

“使用数据的人更多,那么你的收获也会比限制使用这些数据时更多”,加州大学圣克鲁兹分校

(University of California, Santa Cruz)的海洋学家Raphael Kudela如此说到,他利用卫星图像来研究HABs。在他的研究领域中,数据免费分享令他们大有裨益,这让全球的研究人员可以从上空研究HABs并优化HABs追踪和预测系统。

追踪HABs

HABs已成为一个日益关注的全球性问题,这是由于水产养殖业活动增加(既促进藻华形成又受藻华制约),大量富营养的肥料和废水径流排入沿海水域,船舶压载水导致HAB物种的转移,以及气候变化,这些因素可能扩大部分海洋生物的范围及淡水藻华的规模和频率。由于意识的增强和HABs检测的优化(归功于卫星和基水传感器),近年来报道的事件数量不断增加。

伍兹赫尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)的高级研究员以及该研究所的HAB项目负责人Don Anderson称,一些卫星发射项目的主要目的是为HAB研究。新罕布舍尔大学(University of New Hampshire)的研究助理教授Tim Moore说,通过遥感,我们不仅能够获得人所不及之地的观察资料,还可以持续收集,真是一举两得。“这也是遥感如此具有吸引力的原因,”他说。

但是,研究人员也逐渐意识到在HAB研究中不能单靠遥感,要与现场传感器和传统水体采样结合才能达到最佳效果。“我们目前已经处在比较成熟的阶段,我们了解其优势和局限性,对能做什么以及计划做什么更为谨慎,”Anderson说。“这样做才能让我们拥有更健康的环境。”

卫星图像无法检测低生物质的藻华,如亚历山大藻(*Alexandrium fundyense*),一种新英格兰沿海地区常见的鞭毛藻。这种藻类的致命毒素会在季节性的赤潮期间积蓄在贝壳类生物体内,近在咫尺肉眼都无法看

见,更不用说从太空上观察,因为其细胞浓度太低。“如果没有明显的吸光或发光,遥感就无法发现,”NOAA的研究员、负责该机构HAB常规预测工作的Richard Stumpf说。

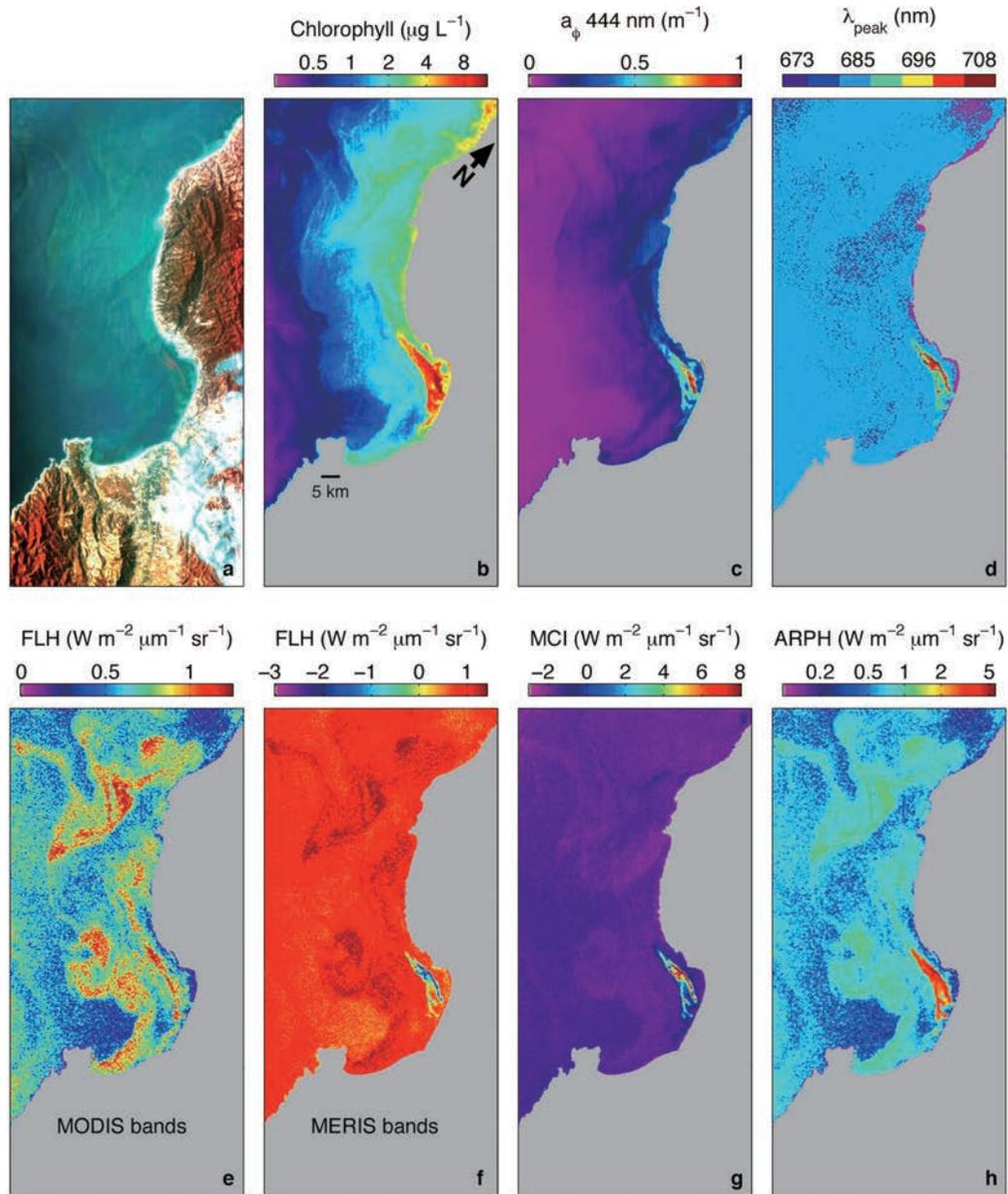
遥感也无法扫描小型淡水水体中的有毒蓝藻菌,因为目前的卫星提供的图像分辨率不够高。Stumpf说道,至少需要3个邻接像素才能准确传递表面状况。

第三个缺点是有时候卫星的“再访频率”无法进行最佳的藻华检测和追踪。换言之,由于传感器没有在某一水域上进行反复调试,且图片可能被遮挡(比如,云层),在某些情况下研究人员可能每周只能获得一张质量较好的图像,Moore说。

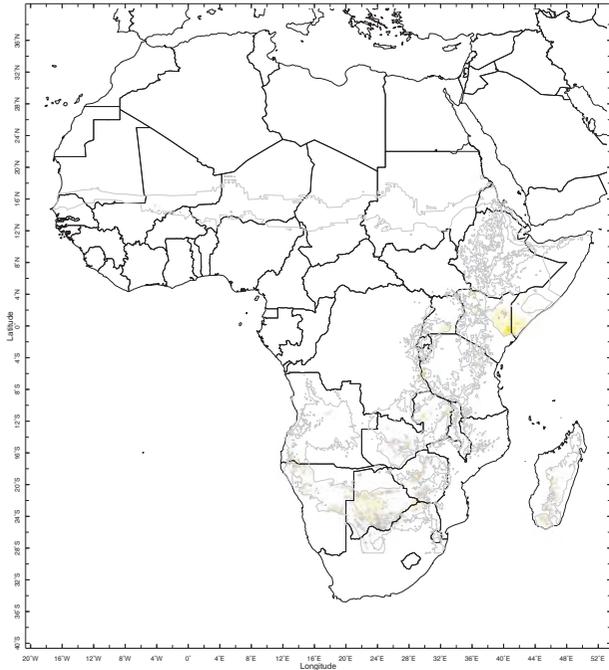
据Kudela介绍,很多情况下,无论在美国还是全球,遥感仍然是一个监测HABs的重要工具,相比离散表面传感器而言,其图像完整、视角广阔、空间信息丰富。Stumpf表示,NOAA利用卫星图像提供墨西哥湾和伊利湖的免费每周预报,墨西哥湾中腰鞭毛藻(*Karenia brevis*)占比最大,且白天聚集在海洋的表面;伊利湖中铜绿微囊藻浮至水面,形成颜色鲜亮、肉眼可见的浮渣。每到夏季微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)会威胁到伊利湖周围数百万人的饮用水,它导致了俄亥俄州托利多市在2014年8月关闭了供水。NOAA的预报曾预测到一次严重的藻华,与影响到托多利的那一次很相似。

Stumpf说,ESA的哨兵-3太空飞行任务计划在2015年启动,将会用一个探测器解决分辨率低的问题,使研究人员能够监测湖中小到1公里范围的藻华。Kudela强调,一旦哨兵-3开始工作,“我们就可以采用我们所知的有效方法立刻应用到更小的水体中去。”

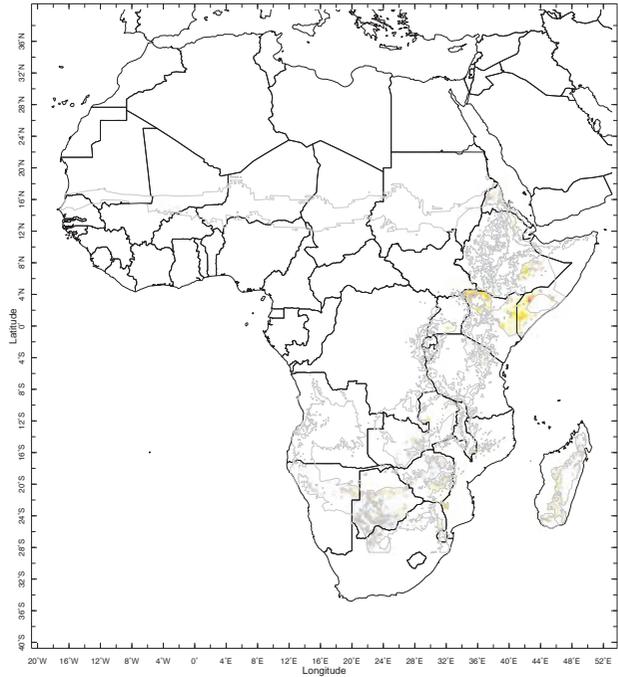
在期待未来更高分辨率传感器的同时,目前的研究集中在定量算法的改进和专门研究上,从而更好地利用卫星收集的图像。Moore正在开发



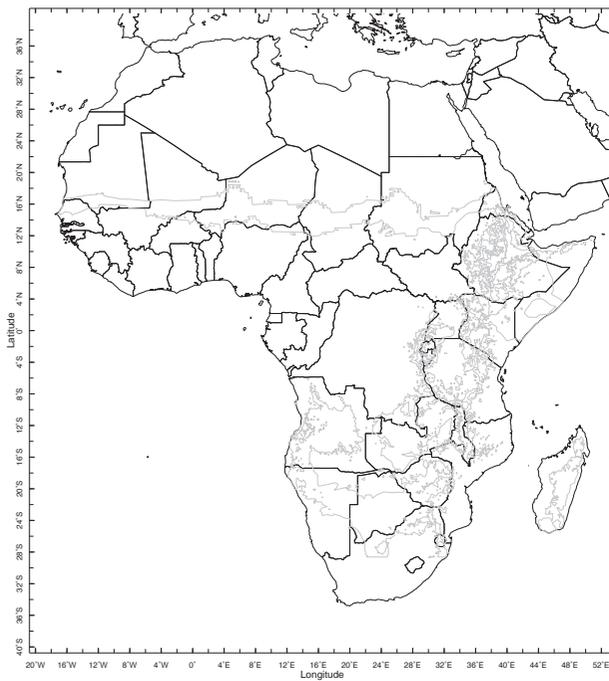
图片为加州中部外海蒙特利湾地区，有国际空间站的近海高光谱成像仪（Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean, HICO）拍摄于2012年11月6日。HICO数据的高空间和光谱分辨率可以检测不同的浮游植物种群，其中一部分可以形成小型的密集斑块状。研究人员分析了用不同算法来表征不同种群的差异，如同照片、X射线和MRI可以揭示医学问题的不同方面。图h为连续描述不同藻华类型和生物质水平的浮游植物光信号的算式结果，让人们对未来新一代遥感可能做到的事窥见一斑。图片：Ryan等（2014）。



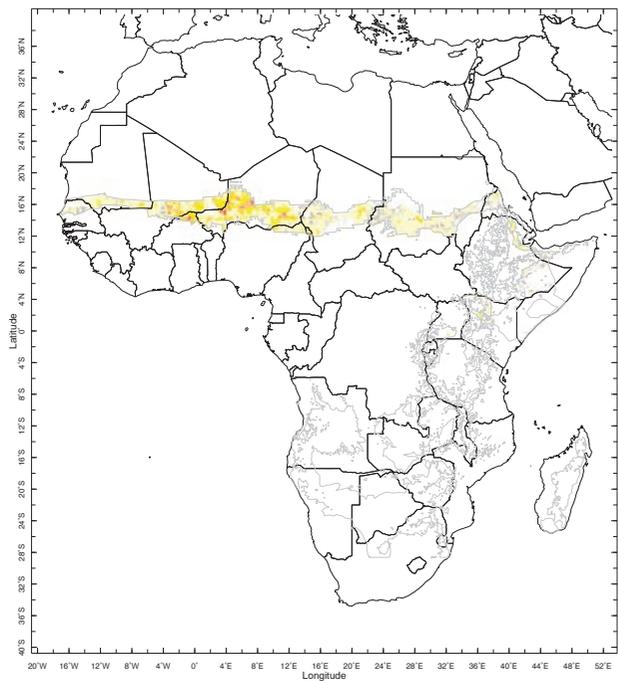
3-10 Dec 2013



6-13 Mar 2014



2-9 Jun 2014



29 Aug 2014 - 5 Sep 2014

哥伦比亚大学国际气候和社会研究所的研究人员利用遥感采集的降雨量和气温数据来预测非洲疟疾和脑膜炎的爆发。疟疾的暴发不仅和降雨相关，在某些地区也和温度相关。卫星跟踪让研究人员可以在疾病流行前 2~3 个月就进行预报。图片：IRI

新的算法，通过有效利用有机体吸收和发散光的能力，更好地评估伊利湖和其他淡水水体中的微囊藻。“如果对某物种的光学特性有深入的了解，那么就有可能开发出针对这一物种的算法，”他说。“最终的目标是发现HAB何时形成。”

与此同时，在美国西海岸，俄勒冈州立大学的助理教授Angelicque White使用遥感来识别俄勒冈海岸的HABs预测因子，评估这些事件发生的危险期，并研究卫星可以检测到的藻华生物物质的代替指标，比如海平面温度。但她说，无论这些工具如何改进，这些测量值永远都无法独立存在于功能预警系统中。“遥感是一个相对有效的HAB监测工具，”White说，“但它必须与某种监测项目相结合。”

传染病监测

在预测传染病爆发方面，卫星数据也是优缺并存。研究人员发现环境因素与疾病（如疟疾、脑膜炎及其他）的传播之间存在强相关性。现在他们利用卫星来追踪这些因素，从而

预测和评估疾病爆发的风险，进而影响诸如疫苗分发等管理决策。

然而，与监测HABs相类似，卫星图像无法提供能反映地面状况的完整或完全可靠的照片，需要结合地面传感数据来验证，哥伦比亚大学国际气候和社会研究所（International Research Institute for Climate and Society, IRI）的高级研究科学家Madeline Thomson说到。举例而言，半干旱地区的高反射率让卫星“看”不到那里的灰尘，NASA戈达德空间科学研究所（Goddard Institute for Space Studies）和哥伦比亚大学的助理研究科学家Carlos Pérez García-Pando说。

科学家才刚刚开始研发来自遥感数据的实用工具，比如在线地图，以帮助政府部门和卫生组织预知疾病爆发。“遥感识别特定土地覆盖类型、监测植物变化、估计降水量的功能可以追溯到1980年代，”Thomson说。

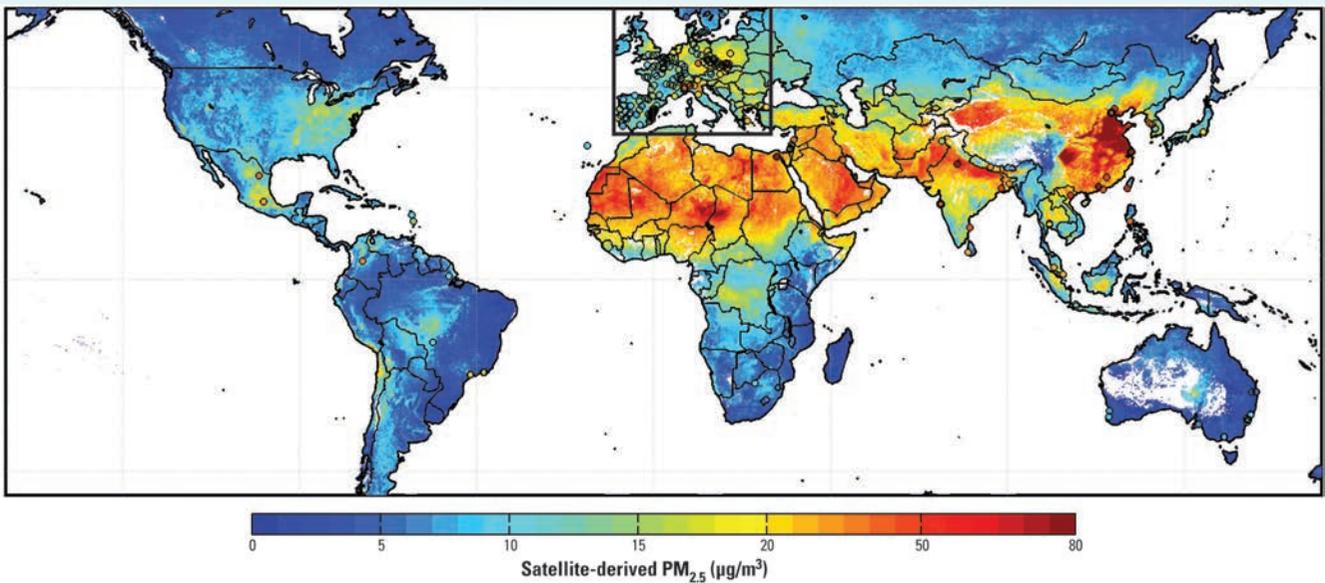
“但是对于研究人员而言，我们把这些信息转换成实用的东西花了很长时间。我想现在我们快成功了。”

据在该领域中有20年工作经验的

Thomson介绍，使用卫星数据来预测疾病爆发的这门学科在疟疾方面最成熟，因为其全球负担大，所以优先考虑。降雨是这种疾病的首要环境因子，因为雨水通过创造蚊子的繁殖场所，激活了蚊子的生命周期。但是在高海拔地区，比如肯尼亚的高地，温度可能是主要的变量，因为在更寒冷的地区，温度的小幅升高就与疟疾传播风险的大幅增加相关。通过利用卫星监测降雨量和温度，科学家可以预报2~3个月的疟疾流行情况，IRI研究科学家和环境检测项目负责人Pietro Ceccato说。

IRI通过一个大型的在线数据库提供免费的疟疾危险因素卫星图像和地图。他们开发的界面让非专业人员能够直观地看到不同时间序列上的不同环境因素，并能够整合其到流行病学资料。

“我一直在（不同国家的）卫生部和农业部工作，他们都使用这个工具，”Ceccato说。“要绘制这些信息的地图并不难，他们可以用这些信息来做决策。”



Aaron van Donkelaar 及其同事进行的研究具有突破性，首次展示了PM_{2.5}长期暴露的全球分布图。该团队利用卫星数据得出无地面采样地区的空气质量估值。根据作者的估计，全球80%人群居住地的PM_{2.5}浓度超过世界卫生组织（WHO）10 µg/m³的空气质量参考值。图片：van Donkelaar 等（2014）。

IRI开发了类似的地图和工具来预测非洲“脑膜炎地带”的流行性脑膜炎爆发情况，该地带从塞内加尔到埃塞俄比亚横跨整个非洲大陆的中部。1996~2010年该地区报道有超过80万例脑膜炎，死亡率为10%。

该地区使用的脑膜炎多糖疫苗通常只有2~3年的免疫力。因此，出于经济和物流考虑，他们采取的策略为反应性疫苗接种，Pérez García-Pando说道；当某一个地区的病例数量达到临界值，就会进行疫苗接种。但有时反应太慢，所以科学家们试图利用已知的脑膜炎传播环境因素来进行预报，希望这样可以大幅提高疫苗分发的有效性。

该地区脑膜炎的爆发与气候干燥和粉尘含量高有关。Pérez García-Pando说，科学家们并不完全了解这两者之间关系的本质，现在主要有2大假设：一，空气中的粉尘颗粒刺激黏膜，使脑膜炎球菌进入血液；二，该地区粉尘中的铁含量较高，此为细菌的养分，会促进细菌的增殖、传播和感染。

无论机制为何，研究人员发现，正如旱季沙尘暴有助于疾病的传播，湿度高的时候也会让流行病得到抑制并通常会终止，Thomson说。对于需要知道何时何地提供疫苗的卫生部门，湿度监测是一个十分有价值的工具。

位于科罗拉多州的大气研究大学联盟（University Corporation for Atmospheric Research, UCAR）进行了一项有关天气和脑膜炎之间关系的长期研究，研究发现脑膜炎活动性的最佳预测因子是2周前的相对湿度。“这个结果非常可靠，我们在数据中反复看到，”UCAR教育研究办公室主任及脑膜炎项目的协调员Rajul Pandya说。“这和当地居民的经验相符——即脑膜炎只出现在炎热和尘土多的时候。”UCAR的研究人员得出的结论是，如果预计某个地区2周后的湿度超过40%，那么卫生管理人员应该考虑在

其他地方发放疫苗，Pandya说。

污染物监测

人造卫星甚至可以用于检测其他潜在威胁，比如地球表面悬浮的二氧化氮（NO₂）和细颗粒物（PM_{2.5}）。最新的研究进展让我们能了解全球的空气污染物浓度，这对公共卫生具有重大意义。即使短期的高水平NO₂暴露也可能对病患和健康人产生一系列不良影响，而颗粒物污染既影响心血管系统也影响呼吸系统，且与心脏病或肺病患者的过早死亡相关。

科学家可以使用先进的绕地传感器来检测NO₂，包括NASA的Aura卫星上搭载的臭氧检测仪（Ozone Monitoring Instrument, OMI）以及ESA的MetOp-A卫星上的全球臭氧监测仪（Global Ozone Monitoring Experiment 2, GOME-2）。

PM_{2.5}的监测工具包括NASA的Aqua和Terra卫星上的中分辨率成像光谱仪（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS）以及Terra卫星上的多角度成像光谱仪（Multi-angle Imaging SpectroRadiometer, MISR）。在这两种情况下，研究人员可以扫描卫星与地球表面之间的大气气柱——如同钻探一个冰芯，但实际上并没有抽出任何东西——然后使用模型来估计地表附近整体浓度的比例，通常在100米内。

加拿大新斯科舍省哈利法克斯市戴尔豪西大学（Dalhousie University）的一个团队最近在这两方面均取得了突破性的研究成果。值得一提的是，2010年他们在EHP上发表的论文首次展示了PM_{2.5}平均为6年的长期暴露的全球分布图。该俯视图用各种颜色对地球地貌进行编码来表示不同的PM_{2.5}浓度。从非洲撒哈拉沙漠到东亚分别为橘色、红色和深红色，表示极高的PM_{2.5}浓度，大部分中欧地区是黄色，表示中等的PM_{2.5}浓度，地球上其余大部分地区包括大部分美国是浅蓝色和深蓝色，表示低PM_{2.5}浓度（今年初

NASA和EPA合作，将美国和部分加拿大地区的卫星数据整合成相类似的地图）。

“在卫星观测之前，人们并没有完全意识到PM_{2.5}的增幅如此之大，”戴尔豪西大学大气成分教授及研究的合作者Randall Martin说。“我们使用的卫星已经运转了近15年，自卫星发射后又经历了10年才写出这篇论文，才有大家今天看到的地图。是许多科学家做了大量的努力才让这一切成真。”

以前的研究集中在拥有地面传感器的城市，大部分农村地区没有被包括进去。“[对于这些数据]的确有大量需求，因为这是少数相对一致的全球数据集，”戴尔豪西大学物理和大气科学系博士后及文章的主要作者Aaron van Donkelaar说。“我认为全球空气质量问题是要解决的。这些数据让人们了解整体的空气质量和全球空气质量的差异，对此我感到非常自豪。”目前EHP正在审议他们的另一篇后续研究。

位于波士顿的非营利性健康效应研究所（Health Effects Institute）是使用该团队数据的机构之一，负责空气污染健康效应流行病学项目的该研究所首席科学家Aaron Cohen介绍到。“他们的估值很关键，因为他们在相当精确的空间尺度上提供了完整的全球数据。这是我们第一次可以了解整个地球的情况，”他说。“他们从很多方面改变了我们可以做的健康效应研究的类型，比如规模和范围，你不用再（仅仅）依靠地面监测器。”

2008年，上述论文的其中一些作者利用卫星数据发表了全球首份地面NO₂浓度评估。Van Donkelaar称该研究以北美为例，此后他们的研究有一些研究分析了其他地区的情况。他强调，这些研究可以让人们了解空气污染的一些特定来源，它们并不是平均分布在大气之中。

NO₂研究的主要作者Lok Lamsal现

为戈达德太空飞行中心 (Goddard Space Flight Center) 的研究科学家, 他的研究重点是卫星测量的NO₂浓度。他说, 与二氧化硫和甲醛等一些其他污染物相比, 研究人员对于遥感的NO₂数据更有信心。但目前的NO₂测量值会受到相对较低的OMI图像分辨率影响, 而OMI是提供图像的主要仪器。Lamsal说, OMI还由于出现故障导致有一半的像素无法使用。

ESA的哨兵-5P预计在2016年发射, 其载荷的对流层监测仪 (Tropospheric Monitoring Instrument, TROPOMI) 将改善OMI分辨率大约为10~20 km²这一情况。NASA也计划发射一个新的卫星仪器, 即对流层污染监测 (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution, TEMPO), 将能够每小时以更高分辨率检测NO₂浓度, 提供更高的时间和空间分辨率。

“未来几年我们将会获得更高质量的数据。” Lamsal说。“过去十年有关NO₂的信息确实有了巨大的改善, 而未来几年还将会[进一步]改善。”

与此同时, 他与其他NASA研究人员继续优化模型和算法, 将现有卫星数据转化为有用的产品, 并通过该机构的空气质量应用科学团队来帮助空气质量研究人员和管理人员应用这些模型和算法。即便新的算法和仪器会提高研究人员遥感检测大气NO₂的能力, Martin依然认为地面传感器是一个必要的组成部分, 能提供高空间分辨率和垂直廓线信息。

新一代卫星

大部分搭载在卫星上的环境监测仪器是在近地轨道, 即其高度为160公里 (轨道周期约为88分钟) 至2000 km (轨道周期略大于2小时)。Haynes介绍, NASA目前运行17颗卫星, 从多种角度进行人类健康研究和管理, 包括通过自然灾害的预测、减缓和应急; 生态预报, 包括HABs; 支持空气质量管理和政策; 评估用水量和水质。NOAA也运行若干具有相似目标的地球科学卫星。

新一代的环境传感器将很快加入或替代上述仪器, 继续支持现有的研究方向, 也可以用于新的研究方向, 从而开启一个基于卫星的环境健康研究新时代。举例而言, ESA与荷兰合作的TROPOMI将每日观测一系列与健康有关的大气化合物: 臭氧、NO₂、二氧化硫、一氧化碳、甲烷、甲醛和气溶胶。它能检测所有其前身OMI可以检测和不能检测的物质, 且分辨率更高。

ESA的哨兵-3海洋陆地色彩仪分辨率更高, 将给HAB研究人员带来便利。(2020年前发射哨兵-3, 之后还将发射另外3颗卫星, 所有卫星均执行地球观测任务。) NASA的预气溶胶、云和海洋生态系统太空探测任务计划于2019年或2020年发射, 将提供海面的高光谱图像 (包括同步采集数据和若干相邻窄波段) 并监测大气化学变化。

未来10年还有一项计划是NASA的对地同步沿海污染和空气污染探测任务。这颗观测北美、南美及相邻海域

的对地同步卫星将测量对流层的痕量气体和气溶胶以及近岸海洋中的浮游植物、水质和生物地球化学。此外, NASA和加州理工学院开发的高光谱红外成像仪预计在2022年发射, 将采集生态和环境健康因素的监测数据, 如植被覆盖、旱灾和森林火灾。

还有更多的仪器会在亚洲发射。包括中国、日本、印度和韩国等诸多国家均是国际地球观测组织 (Group on Earth Observations, GEO) 的成员, 该组织成立于2003年, 旨在更好地获取地球科学数据, 但整体而言他们没有跟NASA、NOAA和ESA一样承诺可以使用他们的数据, Kudela说道。

尽管并非尽善尽美, 但这些新的卫星满载着希望。它们从数千公里之外拍摄的图片帮助科学家识别用显微镜才能观察到的藻类细胞, 它们给卫生工作者提供有关疾病流行的救生信息以及远程监测边远地区的空气质量——所有这些都不过发生在人类首次探索太空之后60年。

Nate Seltenrich, 来自加州帕塔鲁马, 他的写作领域涵盖科学和环境。其作品发表在《高乡新闻》(High Country News)、《塞拉》(Sierra)、《地球岛杂志》(Earth Island Journal) 及其他地方性或全国性出版物上。

译自EHP 122(10):A268-A275 (2014)

翻译: 汪源

本文参考文献请浏览英文原文

[原文链接](#)

<http://dx.doi.org/10.1289/ehp.122-A268>

欢迎登录《环境与健康展望》中文版网页

为方便广大读者第一时间阅读《环境与健康展望》中文版的最新文章, 现已推出中文的网络版, 您登录后即可实现轻松阅读。



请登录

<http://cehp.niehs.nih.gov/>